Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 318–320.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-318
ORCID: 0000-0003-4933-0441

АНАЛИЗ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ БОРТОВЫХ ИОНОЗОНДОВ КА «ИОНОСФЕРА-М» ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 19–20 ЯНВАРЯ 2026 г.

В. В. Носикова[1], М.В. Клименко[1], И.С. Янковский[1], И.А. Носиков[1], С.А. Пулинец[2], К.Г. Цыбуля[3], А.В. Тимченко[1], Д.В. Чугунин[2], М.М. Могилевский[2]

[1]Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия
[2]Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия
[3]Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Москва, Россия

ANALYSIS OF IONOSPHERIC PARAMETERS BASED ON DATA FROM ONBOARD IONOSONDES OF IONOSPHERE-M SATELLITES DURING THE GEOMAGNETIC STORM OF JANUARY 19–20, 2026

V.V. Nosikova[1], M.V. Klimenko[1], I.S. Yankovsky[1], I.A. Nosikov[1], S.A. Pulinets[2], K.G. Tsybulya[3], A.V. Timchenko[1], D.V. Chugunin[2], M.M. Mogilevsky[2]

[1]West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia
[2]Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3]Fedorov Institute of Applied Geophysics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Аннотация. Представлены первые результаты сопоставления данных внешнего радиозондирования ионосферы с борта спутников «Ионосфера-М» (проект «Ионозонд») с данными наземных инструментов обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН — ионозонда вертикального зондирования «Парус-А» и камеры полного неба. Показано хорошее согласие критических частот F2-слоя в спокойных геомагнитных условиях (расхождение ~0.1 МГц). В период сильной геомагнитной бури 18–22 января 2026 г. (*Dst* = –236 нТл, *Kp* = 8.67) совместный анализ выявил эффекты поглощения сигнала, расслоение F-области, рассеянные следы, а также динамику отражений от стенок главного ионосферного провала. В то же время оптические наблюдения зафиксировали смещение авроральной зоны южнее 54° с.ш. и наличие SAR-дуги. Полученные результаты подтверждают надежность работы бортовых ионозондов ЛАЭРТ и демонстрируют широкие возможности совместного использования спутниковых и наземных данных для мониторинга ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, внешнее зондирование, вертикальное зондирование, геомагнитная буря, главный ионосферный провал, авроральные явления, оптические наблюдения.

Abstract. The first results of a comparison between topside radio sounding data of the ionosphere from the Ionosfera-M satellites (Ionozond project) and data from ground-based instruments of the Kaliningrad Branch of IZMIRAN observatory — the Parus-A vertical sounding ionosonde and an all-sky camera — are presented. Good agreement of the F2-layer critical frequencies under quiet geomagnetic conditions is shown (discrepancy of ~0.1 MHz). During the severe geomagnetic storm of January 18–22, 2026 (Dst = –236 nT, Kp = 8.67), the joint analysis revealed signal absorption effects, F-region stratification, scattered traces, as well as the dynamics of reflections from the walls of the main ionospheric trough. At the same time, optical observations recorded a southward shift of the auroral zone below 54° N and the presence of a SAR-arc. The obtained results confirm the reliability of the LAERT onboard ionosondes and demonstrate the broad potential of combined satellite and ground-based data for ionospheric monitoring.

Keywords: ionosphere, topside sounding, vertical sounding, geomagnetic storm, main ionospheric trough, auroral phenomena, optical observations.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера Земли оказывает существенное влияние на условия прохождения радиосигналов, что критически важно для бесперебойной работы систем связи, загоризонтной радиолокации и глобальных навигационных спутниковых систем [Kotova at al., 2019]. Популярные в настоящее время методы глобального мониторинга ионосферы с помощью приемников сигналов ГНСС предоставляют информацию об интегральном параметре полного электронного содержания, но не позволяют получать вертикальное распределение электронной концентрации. Проблема отчасти решается использованием данных вертикального и наклонного зондирования, однако число таких станций сравнительно невелико.

Комплекс научной аппаратуры спутников «Ионосфера-М» проекта «Ионозонд» позволяет проводить регулярные измерения методами внешнего и трансионосферного зондирования [Pulinets at al., 2026]. В сочетании с данными наземных наблюдений это дает уникальный массив данных для мониторинга F-области ионосферы на качественно новом уровне.

Уникальность применения ионозондов на спутниках «Ионосфера-М» заключается в организации одновременного и непрерывного функционирования четырех бортовых ионозондов, размещенных на различных солнечно-синхронных орбитах. Пространственно-временное разнесение

спутников обеспечивает одномоментный охват ключевых локальных секторов ионосферы: утреннего, дневного, вечернего и ночного.

Целью данной работы является сравнение данных бортовых ионозондов ЛАЭРТ с данными наземных инструментов обсерватории КФ ИЗМИРАН — ионозонда вертикального зондирования «Парус-А» и камеры полного неба — как в спокойных, так и в возмущенных геомагнитных условиях.

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ

Бортовой ионозонд ЛАЭРТ установлен на спутниках «Ионосфера-М» (высота орбиты ~820 км). Рабочий диапазон частот — от 100 кГц до 20 МГц, что полностью перекрывает ключевые характеристические частоты локальной плазмы. Период цикла зондирования составляет 10 с, что обеспечивает пространственное разрешение ~80–90 км вдоль траектории полета.

Наземный ионозонд вертикального зондирования «Парус-А» [Гивишвили и др., 2013] всероссийской сети ионозондов ИПГ (расположение — обсерватория КФ ИЗМИРАН, 54.36° с.ш., 20.12° в.д.) работает в диапазоне 1–20 МГц. Измерения проводятся каждые 15 мин, каждый час производится ручная обработка ионограмм.

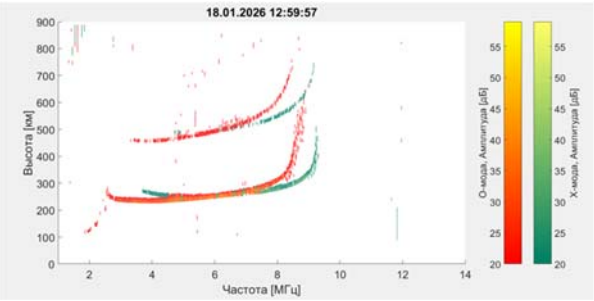
Камера полного неба (расположение — 54.57° с.ш., 20.17° в.д.) обеспечивает круглосуточную съемку всей полусферы неба с разрешением 3840×2160 пикселей в диапазоне длин волн 400–720 нм, регистрируя авроральные явления, серебристые облака и другие атмосферные эмиссии [Chernyshov et al., 2025].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спокойные геомагнитные условия. Анализ ионограмм за 18 января (рис. 1), соответствующих спокойным геомагнитным условиям, показал совпадение критических частот f_oF2 и f_xF2 (8,8 и 9,2 МГц). На обеих ионограммах видны обыкновенная и необыкновенная моды слоя F2. На записи «Парус-А» также присутствует слой E и небольшое рассеяние сигнала вблизи f_oF2. Расхождение критических частот между наземным и бортовым зондированием — около 0,1 МГц, что объясняется неодновременностью измерений и разницей в режимах работы. Представленная ионограмма «ЛАЭРТ» получена в момент максимального сближения спутника с обсерваторией.

Геомагнитная буря 18–22 января 2026 г. Сильная буря (*Dst* = –236 нТл, *Kp* = 8.67) была вызвана солнечной вспышкой класса X1.9. На ионограммах начального этапа бури (19 января) наблюдаются спорадический слой аврорального типа с f_oEs ≈ 2.5 МГц и рассеянный след типа P-шпора на высотах 600–700 км. Следы от регулярных слоев E и F2 отсутствуют из-за поглощения сигнала (рис. 2). На ионограмме ЛАЭРТ отражение от Земли обрывается на частоте около 4.7 МГц.

В главную фазу бури (20 января) на ионограммах «Парус-А» зарегистрировано расслоение в F-области с f_oF2 ≈ 6.4 МГц и 7.3 МГц (рис. 3), что свидетельствует о нахождении обсерватории внутри главного ионосферного провала [Деминов, Карпачев, 1986]. На ионограммах ЛАЭРТ также присутствуют отраженные сигналы от двух слоев с f_oF2 ≈ 7.3 МГц и 10.8 МГц, а также рассеянный след на наклонной дальности 1300–1400 км.



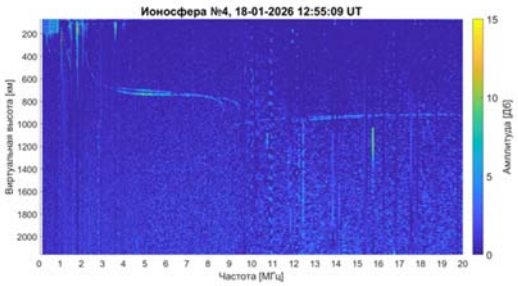
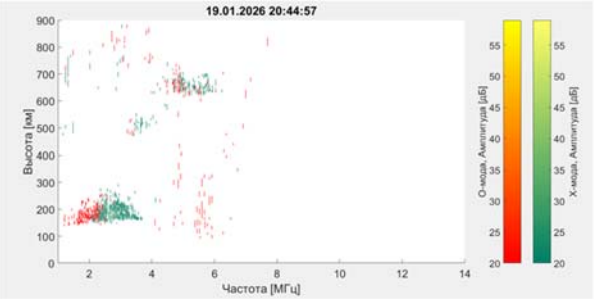


Рис. 1. Сравнение ионограмм, полученных 18.01.2026 ионозондом «Парус-А» (слева) в обсерватории КФ ИЗМИРАН в 12:59:57 UT и бортовым ионозондом ЛАЭРТ (справа) КА «Ионосфера-М» № 4 в 12:55:09 UT



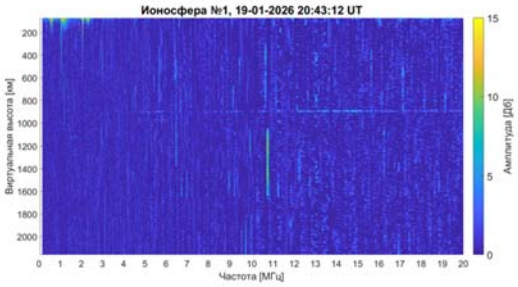


Рис. 2. Сравнение ионограмм, полученных 19.01.2026 ионозондом «Парус-А» (слева) в обсерватории КФ ИЗМИРАН в 20:44:57 UT и бортовым ионозондом ЛАЭРТ (справа) КА «Ионосфера-М» № 1 в 20:43:12 UT

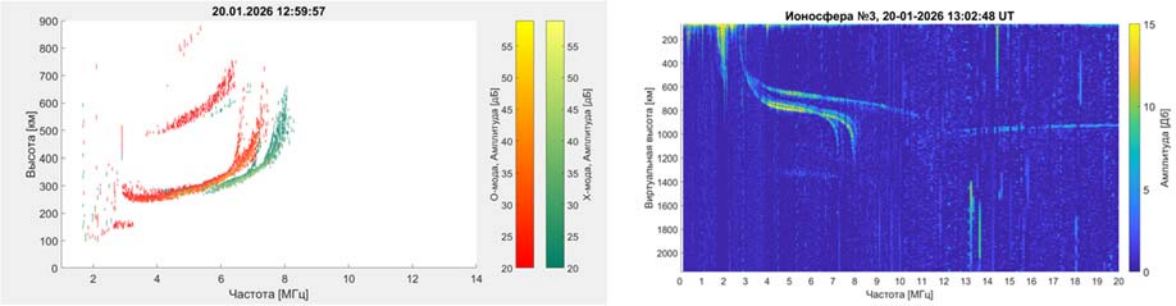


Рис. 3. Сравнение ионограмм, полученных 18.01.2026 ионозондом «Парус-А» (слева) в обсерватории КФ ИЗМИРАН в 12:59:57 UT и бортовым ионозондом ЛАЭРТ (справа) КА «Ионосфера-М» № 3 в 13:02:48 UT

Анализ пролета КА «Ионосфера-М» № 3 над главным ионосферным провалом (13:02–13:03 UT) позволил проследить эволюцию отражений от стенок провала от момента возникновения до формирования кратных отражений на меньших дальностях.

Совместные оптические наблюдения. Камера полного неба зафиксировала полярные сияния красного и зеленого спектров в зените обсерватории (южнее 54° с.ш.), что указывает на смещение авроральной зоны. На ионограммах ЛАЭРТ при нахождении спутника над авророй наблюдалось сильное рассеяние сигнала и отсутствие отражения от Земли. При выходе из зоны сияний рассеяние ослабевало и регистрировался отраженный от Земли сигнал. Особо отмечено пересечение узкой области полярного сияния красного цвета — SAR-дуги, где рассеяние и поглощение сигнала вновь усиливались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное сопоставление данных бортовых ионозондов ЛАЭРТ (спутники «Ионосфера-М») с данными наземного ионозонда «Парус-А» и камеры полного неба обсерватории КФ ИЗМИРАН позволяет сделать следующие выводы. В спокойных геомагнитных условиях наблюдается высокая сходимость критических частот F2-слоя, полученных наземным и бортовым ионозондами (расхождение ~0.1 МГц).

В период сильной геомагнитной бури (19–20 января 2026 г.) совместный анализ выявил комплекс эффектов: поглощение зондирующих сигналов, расслоение F-области, формирование рассеянных следов типа P-шпора, а также динамику отражений от стенок главного ионосферного провала, включая кратные отражения.

Синхронное использование оптической камеры полного неба и бортового ионозонда позволило зафиксировать смещение авроральной зоны южнее 54° с.ш., идентифицировать SAR-дугу и связать особенности модовой структуры ионограмм с положением спутника относительно авроральных образований.

Полученные результаты свидетельствуют о возможностях совместного использования данных внешнего зондирования со спутников «Ионосфера-М» и наземной инфраструктуры как для фундаментальных исследований морфологии и физики ионосферных явлений, так и для прикладных задач.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №26-12-00513, https://rscf.ru/projects/26-12-00513.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гивишвили Г.В., Крашенниников И.В., Лещенко Л.Н. и др. Ионозонд «Парус-А»: функциональные возможности и перспективы развития // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 68–74.

Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. I. Положение провала // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 1. С. 63–68.

Chernyshov A.A., Klimenko M.V., Nosikov I.A., et al. Effects in the upper atmosphere and ionosphere in the subauroral region during Victory Day 2024 Geomagnetic Storm (May 10–12, 2024) // Adv. Space Res. 2025. V. 76, N 12. P. 7325–7350.

Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V., et al. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // GPS Solutions. 2019. V. 24, 25.

Pulinets S., Tsybulya K., Depuev V., et al. Ionospheric topside sounding revival // Adv. Space Res. 2026. V. 77. P. 2574–2587.